

## 基于圆边响应离焦估计的望远物镜自动调焦方法

罗其俊 葛宝臻

**An automatic focusing method of a telescope objective lens based on the defocusing estimation of a circular edge response**

LUO Qi-jun, GE Bao-zhen

引用本文:

罗其俊, 葛宝臻. 基于圆边响应离焦估计的望远物镜自动调焦方法[J]. *中国光学*, 2020, 13(4): 760–769. doi: 10.37188/CO.2019–0247

LUO Qi-jun, GE Bao-zhen. An automatic focusing method of a telescope objective lens based on the defocusing estimation of a circular edge response[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(4): 760–769. doi: 10.37188/CO.2019-0247

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2019–0247>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 采用五棱镜扫描法检测大口径平面镜的面形

Surface shape measurement of large flat mirrors using a scanning pentaprism method

中国光学. 2019, 12(4): 920 <https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0920>

#### 大口径衍射望远系统初始结构研究

Initial structure of large aperture diffractive telescope

中国光学. 2019, 12(6): 1395 <https://doi.org/10.3788/CO.20191206.1395>

#### 离焦对激光通信接收视场的影响分析

Analysis of the influence of defocus on the field of view of laser communication reception

中国光学. 2018, 11(5): 822 <https://doi.org/10.3788/CO.20181105.0822>

#### 一种针对超大口径凸非球面的面形检测方法

Surface testing method for ultra-large convex aspheric surfaces

中国光学. 2019, 12(5): 1147 <https://doi.org/10.3788/CO.20191205.1147>

#### 多尺度窗口的自适应透射率修复交通图像去雾方法

A traffic image dehaze method based on adaptive transmittance estimation with multi-scale window

中国光学. 2019, 12(6): 1311 <https://doi.org/10.3788/CO.20191206.1311>

#### 星载激光测高仪距离参数地面标定方法

Ground calibration method for distance parameters of satellite-borne laser altimeter

中国光学. 2019, 12(4): 896 <https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0896>

# 基于圆边响应离焦估计的望远物镜自动调焦方法

罗其俊<sup>1,2\*</sup>, 葛宝臻<sup>1</sup>

(1. 天津大学 精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072;  
2. 中国民航大学 电子信息与自动化学院, 天津 300300)

**摘要:**本文提出了一种基于圆边响应曲线的离焦估计新算法,实现了调焦参数的标定和望远物镜的自动调焦。建立了圆形边缘的灰度响应与离焦半径的关系模型,设计了圆四周离焦半径的双阈值均值滤波器,实现了模糊图像离焦半径的精确估计,降低了运动模糊和噪声的影响。根据离焦半径与调焦距离的线性关系,采用折线拟合方法,求解正焦调焦距离。然后,利用多个物距和正焦像距,优化求解测距调焦模型参数,实现了成像系统的自动调焦。仿真和实际实验验证了离焦半径估计算法的有效性和鲁棒性。标定后的自动调焦成像系统图像清晰,拍摄距离在43~52 m之间的物理分辨率接近理论值的一半,可分辨线宽优于0.354 mm。

**关键词:**自动调焦;测距法;像距标定;大口径长焦距;离焦估计

中图分类号:TP391.4 文献标志码:A doi:10.37188/CO.2019-0247

## An automatic focusing method of a telescope objective lens based on the defocusing estimation of a circular edge response

LUO Qi-jun<sup>1,2\*</sup>, GE Bao-zhen<sup>1</sup>

(1. *College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering,  
Tianjin University, Tianjin 300072, China;*  
2. *College of Electronic Information and Automation, Civil  
Aviation University of China, Tianjin 300300, China*)

\* *Corresponding author, E-mail: qjluo@cauc.edu.cn*

**Abstract:** A new defocusing estimation algorithm based on the response curve of a circular edge is proposed, through which the calibration of some focusing parameters and the automatic focusing of the telescope objective lens are achieved. The relationship between the gray-scale response of the edge of the circular pattern and the defocusing radius is established. Using the double threshold mean filtering of the defocusing radius around the circle, the accurate defocus radius of the blurred image is calculated and the influence of motion blur and noise is reduced. According to the linear relationship between defocus radius and focus distance, the

收稿日期:2019-12-24; 修订日期:2020-02-22

基金项目:国家自然科学基金重点项目(No. 61535008)

Supported by Key Program from the National Natural Science Foundation of China (No. 61535008)

broken line fitting method is used to obtain the focus distance. Then, by using multiple object and focus image distances, the parameters of the focusing model of the ranging method are optimized and the automatic focusing of the imaging system is achieved. Through simulation and experimentation, the feasibility and robustness of the defocusing estimation algorithm are verified. The images taken by the calibrated autofocus imaging system are clear, have a physical resolution that reaches half of their theoretical value, and have a resolvable line width better than 0.354 mm when the shooting distance is between 43 m and 52 m.

**Key words:** automatic focusing; ranging method; image distance calibration; large aperture long focal; defocusing estimation

## 1 引言

采用远距离扫描摄影检测法进行水工大坝、核电站冷凝塔等大型建筑物表面的裂缝检测是国内外的研究热点<sup>[1]</sup>。该检测法的关键是获得建筑物目标清晰的高分辨率图像。通常的做法是采用长焦距大口径望远物镜的成像系统来提高图像分辨率,通过有效的自动调焦技术来保障成像系统准确聚焦,从而获得清晰图像,因此长焦距大口径望远物镜自动调焦技术的研究尤为重要。

目前,光学系统的自动调焦技术主要包括被动调焦和主动调焦两类<sup>[2]</sup>。被动调焦方法是利用调焦策略,搜索具有最优质量的图像,主要有相位检测法和图像检测法。相位检测法是根据受光元件输出信号的相位差控制调焦机构<sup>[3]</sup>。图像检测法,包括聚焦深度法和离焦深度法,其中:聚焦深度法利用具有单峰选择性的图像清晰度评价函数,查找最佳的像面位置<sup>[4-5]</sup>,典型的清晰度评价函数有 EOG<sup>[6]</sup>、Brenner、信息熵 Entropy<sup>[7]</sup>和频域傅立叶变换<sup>[8]</sup>等。离焦深度法是从模糊图像中估算离焦量,直接计算像面位置,包括微分自相关法<sup>[9]</sup>、频域法<sup>[10]</sup>、模糊差异法<sup>[11]</sup>和小波变换法<sup>[12]</sup>等。当相机存在抖动时,图像清晰度评价函数容易出现伪峰<sup>[13]</sup>,离焦半径估计也会出现错误<sup>[12]</sup>。又由于上述图像评价和离焦估计方法普遍采用统计分析法,图像纹理的差异、噪声和运动模糊均会对它们造成影响<sup>[14]</sup>。还有一种离焦深度法,被称为刃边函数法,该方法根据图像中直线边缘的灰度响应,定量计算离焦半径<sup>[15]</sup>。它克服了目标纹理差异和噪声的影响,在调焦和图像复原中取得了较

好的效果。被动调焦方法由于计算量大、需要多步搜索、调焦速度较慢,不适用于扫描拍摄实时性要求高的场景。主动调焦方法包括三角测距法、红外线测距法、超声波测距法和飞行时间测距法等<sup>[16]</sup>。它通过传感器测量物距,直接计算像距,并控制相机到达像面位置,实现快速稳定的调焦<sup>[17]</sup>。该方法的调焦性能受相机抖动和环境气流的影响较小,具有运算量小、调焦速度快的优点。

本文以成像距离在 30 ~ 70 m 左右的建筑物表面裂缝检测为应用背景,所用光学成像采集系统由焦距为 2032 mm,口径为 203 mm 的望远物镜、高分辨率 CCD 和激光测距系统组成,将基于离焦半径估计的像面估计方法和基于测距的主动调焦方法相结合,实现望远物镜的自动调焦。本文提出了基于圆边响应曲线的离焦估算模型。通过对圆形图案四周的离焦半径分布进行双阈值均值滤波,可精确估计离焦半径。其优点是可以克服噪声和相机抖动造成的运动模糊的影响。采用基于离焦半径数据的折线拟合和非线性方程优化求解方法,解决了测距法调焦方程参数的标定问题,并以此为基础实现了基于测距法的自动调焦成像。

## 2 基于测距的主动调焦原理

### 2.1 系统工作过程

成像系统如图 1 所示,在望远物镜镜筒上加装了激光测距仪,在镜筒后部加装了电动调焦座,由高分辨率 CCD 摄像机接收图像。整个系统置于二维电动转台上,可以对目标物体完成扫描成像,获取多幅高分辨率图像。



图 1 自动调焦成像系统

Fig. 1 Autofocus imaging system

望远物镜为卡塞格林式, 光路示意图如图 2 所示。利用手动调焦旋钮调节反射镜的位置, 从而可以快速调整像面。手动调焦具有调焦范围大、速度快的优点, 但调焦精度低, 操作时会引起成像系统抖动, 造成图像模糊, 手动调焦主要用于目标区域初始位置成像时的粗调焦。电动调焦是由步进电机精确控制 CCD 摄像机的前后移动, 在算法控制下自动完成精调焦。激光测距仪的作用是通过测量成像目标的距离来确定物距, 进而可以依据物像公式确定像面距离。

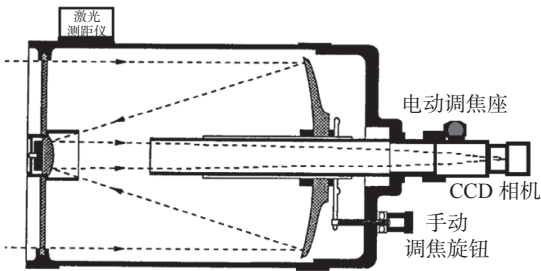


图 2 望远物镜光路示意图

Fig. 2 Light path diagram of telescope objective lens

### 2.2 测距法调焦原理

测距调焦法的原理如图 3 所示, 焦距  $f$  已知, 通过测量物距  $u$ , 可计算出像距  $v$ , 控制 CCD 靶面, 使其处于像面位置, 获得物点  $P$  的正焦点  $P'$ 。

测距仪的安装位置与透镜物方主平面位置间存在偏差, 会导致物距存在偏差, 设其为  $\Delta u$ , 若激光测距仪测量的目标距离为  $u_0$ , 则物距  $u = u_0 + \Delta u$ 。电动调焦座可前后移动, 移动范围为调焦范围, 其中间位置设为零点, 其与像方主平面的距离定义为初始像距  $v_0$ , 调焦座从零点位置到像面位置的移动距离称为调焦距离  $v_x$ , 像面位置与正焦

像面的偏差称为像距偏差  $\Delta v$ , 那么, 像距  $v = v_0 + v_x - \Delta v$ , 调焦座移动件零点到正焦点的距离为正焦调焦距离  $v_{xf} = v_x - \Delta v$ 。如果焦距为  $f$ , 根据高斯成像公式, 得到的测距调焦模型如式(1)所示:

$$\frac{1}{u_0 + \Delta u} + \frac{1}{v_0 + v_{xf}} = \frac{1}{f}, \quad (1)$$

由式(1)可知, 如果已知  $\Delta u$  和  $v_0$ , 就可以由  $u_0$  和  $f$  计算出  $v_{xf}$ , 从而可以控制 CCD 移动到正焦点像面位置, 实现正焦成像。

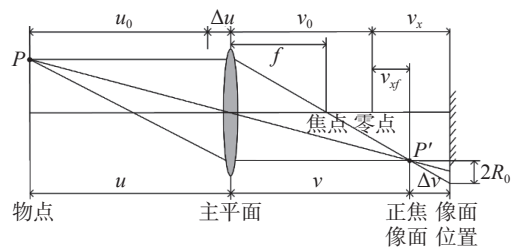


图 3 凸透镜成像模型

Fig. 3 Convex lens imaging model

因此, 问题的关键是确定物距偏差  $\Delta u$  和初始像距  $v_0$ 。  $\Delta u$  是由测距仪安装位置偏差引起的, 是一个固定的偏差, 可以通过标定的方法确定。而  $v_0$  在手动调焦后是变化的, 当拍摄距离变化较大、重新粗调焦后, 需重新估计。由公式(1)可知, 利用多组  $\langle u_0, v_{xf} \rangle$  数据, 可优化求解该方程的参数  $\Delta u$  和  $v_0$ 。由此, 标定的关键就变成精确估计物距  $u_0$  对应的正焦调焦距离  $v_{xf}$ 。

### 2.3 正焦调焦距离估计

如图 3 所示, 点光源在像面上形成的离焦弥散圆半径为  $R_0$  可由公式(2)表示, 总的模糊圆半径  $R$  可用公式(3)表示:

$$R_0 = \frac{D|\Delta v|}{2} \left( \frac{1}{f} - \frac{1}{u} \right), \quad (2)$$

$$R = k_0 R_0 + k_1, \quad (3)$$

其中,  $D$  为镜头孔径,  $k_1$  是由衍射艾里斑、畸变、像差、抖动和大气湍流等其他因素产生的等效模糊半径, 在光学系统质量和拍摄条件较好的情况下, 可认为离焦弥散圆是图像模糊的主要因素<sup>[11, 13]</sup>。那么,  $R$  与  $v_x$  的关系如式(4)所示:

$$R = k_0 \frac{D}{2} \left( \frac{1}{f} - \frac{1}{u} \right) |(v_x - v_{xf})| + k_1. \quad (4)$$

当标靶静止时, 改变调焦距离  $v_x$ , 得到不同模

糊程度的多幅图像, 从而可估算图像中的模糊圆半径 $R$ 。当 $u$ 、 $D$ 和 $f$ 不变时, 利用多组 $\langle v_x, R \rangle$ 数据, 可拟合出公式(4)的折线方程, 得到正焦调焦距离 $v_{xf}$ 。模糊圆半径 $R$ 的估计算法, 将在第3节中介绍。

#### 2.4 物距偏差的标定原理

当测距仪测量的标定靶距离为 $u_0$ 时, 估计得到正焦调焦距离 $v_{xf}$ 。那么, 在第 $j$ 个成像区间、第 $i$ 个物距下可得到 $\langle u_0^{ij}, v_{xf}^{ij} \rangle$ 。在式(5)所示的函数 $f(\Delta u)$ 取最小值时, 可得到物距偏差 $\Delta u$ 的最优值。

$$f(\Delta u) = \frac{1}{NM} \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \left( \frac{u_0^{ij} + \Delta u - f}{u_0^{ij} + \Delta u + f} - v_{xf}^{ij} - v_0^j \right)^2$$

$$v_0^j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{u_0^{ij} + \Delta u - f}{u_0^{ij} + \Delta u + f} - v_{xf}^{ij} \right), \quad (5)$$

其中,  $M$ 为成像区间个数,  $N$ 为每个区间的标定次数。  $f(\Delta u)$ 表征了由 $\Delta u$ 和 $u_0$ 确定的正焦调焦距离误差的均方差。

对 $\Delta u$ 进行标定后, 利用特定的物距 $u_0$ 和估计的正焦调焦距离 $v_{xf}$ , 由公式(1)直接计算初始像距 $v_0$ 。

### 3 基于圆边响应曲线的离焦估计算法

离焦模糊的点扩散函数(PSF) $h(x, y)$ 可近似表示为高斯模型, 如式(6)所示:

$$\begin{cases} h(x, y) = \frac{1}{2\pi r^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2r^2}\right), \\ r = cR \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $r$ 为高斯点扩散函数的标准偏差扩展量, 表征了图像的离焦程度(以下简称离焦半径)。模糊圆半径 $R$ 与 $r$ 成正比<sup>[13]</sup>。  $c$ 为常数, 一般取 $1/\sqrt{2}$ 。从模糊图像中很难直接计算PSF, 但是, 以图像边界位置的灰度分布为线索, 可简化求解得到离焦半径, 边界处的离焦响应曲线 $s$ 仅由离焦半径 $r$ 确定, 如公式(7)所示, 离焦半径 $r$ 可采用奇异值分解或最小二乘法求解<sup>[15]</sup>。

$$\begin{aligned} s &= \mathbf{A}m_r \\ m_r &= \mathbf{A}^+s, \end{aligned} \quad (7)$$

其中,  $\mathbf{A}$ 为 $L \times (D+1)$ 矩阵, 由具有不同半径的灰度响应曲线构成 $\mathbf{A} = [s_1^T; s_2^T; \dots; s_D^T]$ , 其中:  $D$ 为最大的离焦半径,  $L$ 为灰度响应曲线长度,  $s_r^T$ 为离焦半径为 $r$ 时的灰度响应列向量;  $m_r$ 为 $(D+1) \times 1$ 单位列向量, 第 $r$ 个数据为1;  $\mathbf{A}^+$ 是 $\mathbf{A}$ 的伪逆矩阵。基于此

原理, 刃边函数法通过图像中直线边界的灰度响应曲线来估计离焦半径<sup>[15]</sup>。它是在直线边界的垂直方向上提取响应曲线的, 受相机抖动的影响, 响应曲线的位置和方向容易出现偏差。考虑到圆形具有中心对称性, 运动模糊对圆四周离焦估计的影响可互相补偿, 通过统计分析可抑制运动模糊引起的离焦估计误差。因此, 本文基于圆形标记靶图像, 设计了基于圆边响应曲线的离焦半径估计模型。

以图4(a)所示的圆形标记靶为例, 正焦时边缘响应为阶跃分布(如图4(b)所示), 采用 $r=5$ 的高斯点扩散函数在原图像上做卷积运算后, 得到边缘模糊的圆形图案(如图4(c)所示), 其边缘的一维响应曲线, 如图4(d)所示。离焦半径不同, 灰度响应曲线也不同。采用如图4(c)的标示方法, 在过圆心、角度为 $\theta$ 的直线上提取灰度响应曲线 $s_i$ , 利用公式(7), 求解离焦半径 $r_i$ , 得到离焦向量 $\langle r_i, \theta_i \rangle$ 。

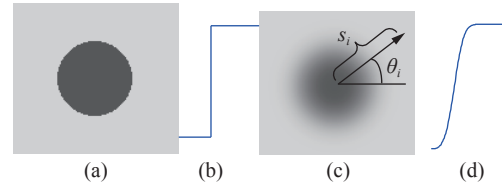


图4 圆边的离焦响应。(a)圆点靶;(b)正焦曲线;(c)离焦图像;(d)离焦曲线

Fig. 4 Defocusing response of circular edge. (a) Circle image; (b) focus curve; (c) defocus image; (d) defocus curve

图5(a)是存在半径为5的离焦模糊和 $45^\circ$ 方向运动模糊的圆点图像, 图5(b)为圆四周的离焦半径分布, 可见, 运动模糊造成了离焦半径分布波动。在运动模糊的影响下,  $45^\circ$ 和 $225^\circ$ 方向的离焦半径增大, 垂直方向的离焦半径估计却减小了。为了抑制运动模糊的影响, 定义了双阈值均值滤波器, 如公式(8)所示:

$$r = \frac{1}{\beta N - \alpha N + 1} \sum_{\alpha N}^{\beta N} r_i', \quad (8)$$

其中,  $N$ 为圆四周离焦半径个数,  $r_i'$ 为 $r_i$ 的正排序,  $\alpha$ 为上限阈值,  $\beta$ 为下限阈值。该滤波器可计算出上下阈值之间数据的均值。合理选择阈值可抑制估计误差。

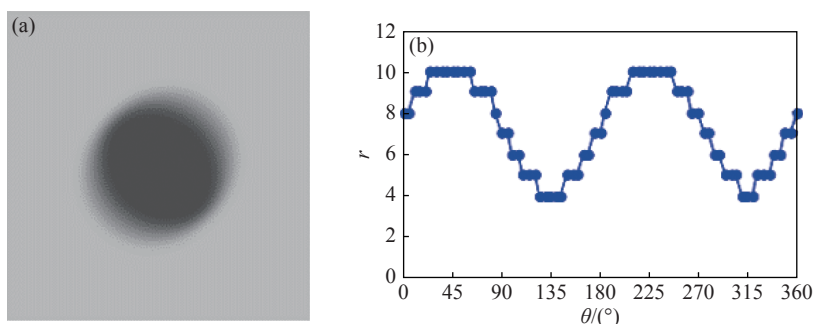


图 5 圆四周离焦估计。(a)模糊图像;(b)离焦半径分布

Fig. 5 Distribution of defocus radius around the circle. (a) Blurred image; (b) distribution of defocus radius

基于圆边响应曲线的离焦估计算法的步骤如下:

Step1 获取圆点标定靶图像,采用中值滤波去噪;

Step2 利用 Canny 算子提取圆形边缘;

Step3 由标定靶距离计算圆形图案的半径;

Step4 采用霍夫变换提取指定半径的圆形边缘;

Step5 以圆心为中心、正右方为  $0^\circ$  开始,每次间隔  $\Delta\theta$ , 提取角度  $\theta_i$  的圆边响应曲线  $s_i$ , 如图 6(a) 所示。

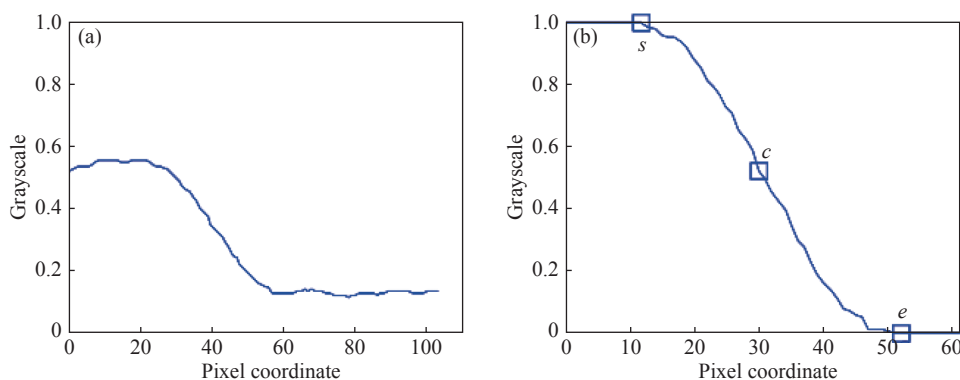


图 6 圆边响应曲线提取。(a)提取曲线;(b)标准化曲线

Fig. 6 Extraction of circular response curve. (a) Extracted curve; (b) standardized curve

Step6 响应曲线标准化。提取  $s_i$  的最大值和最小值,将曲线归一化到 0 与 1 之间。选择最接近 0.5 的点作为中点  $C$ , 查找  $C$  前第一个下降点,记为起始点  $S$ ; 查找  $C$  后第一个上升点,记为结束点  $E$ 。以点  $S$  和  $E$  为极点,重新归一化,得到标准响应曲线,如图 6(b) 所示;

Step7 根据公式(7),采用最小二乘法,求解离焦向量  $\langle r_i, \theta_i \rangle$ ;

Step8 重复 step6, 依次求解 0 到  $360^\circ$  的离焦向量;

Step9 采用公式(8)进行双阈值均值滤波,计算离焦半径  $r$ 。

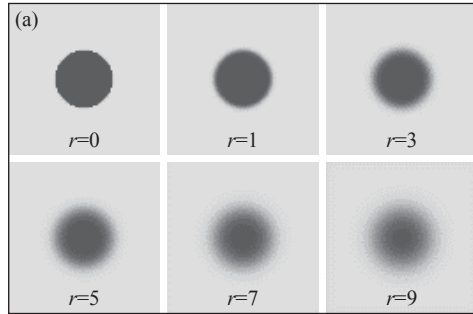
## 4 实验和讨论

### 4.1 圆边响应曲线库构建和离焦估计仿真

采用 MatlabR2014a 图像工具箱,生成离焦图像并建立圆边响应模型。首先,如图 7(a) 所示,生成了半径为 60 pixel 的黑色圆图像,如图中  $r=0$  的图像块;采用高斯点扩散函数,进行离焦模糊,  $r$  依次取值 1, 2, ..., 10, 模糊核尺寸为  $6r+1$ , 得到对应的离焦图像。按第 3 节 step5 和 step6 操作方法,提取每个图像中过圆心  $0^\circ$  直线上长度为 61 的灰度响应数组  $s_i$ , 标准化后得到如图 7(b) (彩图见期刊电子版) 所示的曲线库, 构成响应矩阵

$$A = [S_0; S_1; \dots; S_{10}]^T.$$

然后, 在 MATLAB 仿真环境下, 生成了圆点阵列图像, 在其中添加不同程度的离焦模糊、不



同类型的噪声和不同长度的运动模糊, 分别进行离焦半径估计和误差分析, 验证算法的理论正确性和鲁棒性。

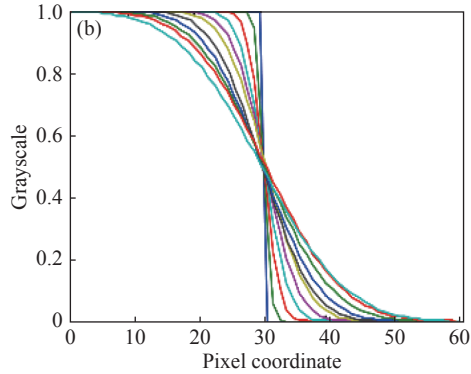


图 7 圆边响应曲线库。(a)不同离焦半径的圆形图像; (b)曲线库。

Fig. 7 Circular edge defocusing response. (a) Circles with different defocusing radius; (b) curve library.

生成半径为 50 pixel 的黑色圆形图像, 采用 fspecial('gaussian', r, sz) 函数, 依次添加  $r=1,2,\dots,10, sz=6r+1$  的离焦模糊, 得到不同程度的离焦模糊图像。采用提出的离焦估计算法处理每幅图像, 得到的离焦半径误差  $\Delta r$  与离焦半径  $r$  的分布

如图 8(a) 所示。实验中, 采用了 7 pixel×7 pixel 的中值滤波, 阈值  $\Delta\theta = 5, \alpha = 0.2, \beta = 0.05$ 。从图中可以看出, 不同离焦半径的估计误差很小, 接近于零。而且,  $\Delta\theta, \alpha$  和  $\beta$  的取值不同, 不增加估计误差。实验结果验证了算法的理论正确性。

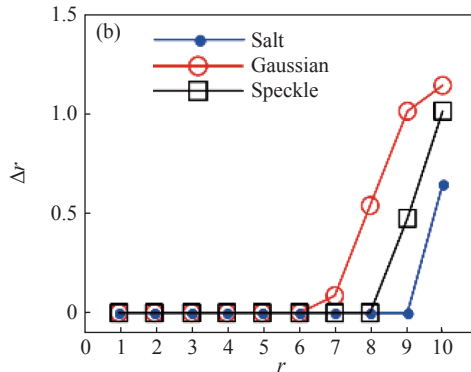
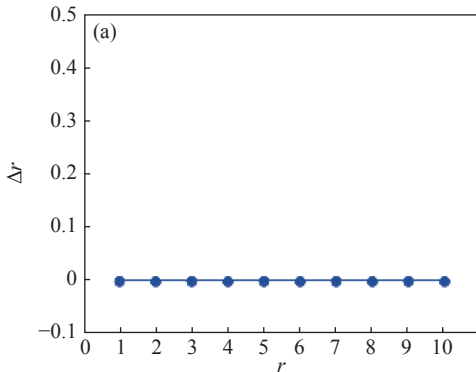


图 8 噪声对离焦估计的影响。(a)无噪声; (b)有噪声

Fig. 8 Influence of noise on defocusing estimation. (a) Without noise; (b) with noise

在生成的不同半径的离焦模糊图像中, 采用 imnoise 函数, 分别添加密度为 0.05 的椒盐噪声、方差为 0.001 的高斯噪声和随机噪声, 采用相同阈值进行离焦半径估计, 误差  $\Delta r$  分布如图 8(b) 所示。其中, 最大值为 1.13 pixel, 均值为 0.17 pixel, 特别是在 1 至 7 之间离焦半径的误差均低于 0.1 pixel。实验结果说明该算法可很好地抑制噪声对离焦半径估计的影响, 特别是在离焦量较小的情况下。

在生成的不同半径的离焦模糊图像中, 采用 fspecial('motion', L, D) 函数, 添加了长度  $L$  分别为 1、2、...、20, 方向  $D$  为随机角度的运动模糊。分别进行离焦半径估计。实验发现, 当阈值  $\alpha = 0.2, \beta = 0.05$  时, 误差最小, 均值为 0.04 pixel, 最大值为 1 pixel。图 9 给出了离焦半径  $r$  分别为 2,4,8 时的误差  $\Delta r$  分布。从图中可以看出, 双阈值均值滤波可抑制运动模糊对离焦半径估计的影响, 当运动模糊长度小于 16 pixel 时, 可将误差控制在

0.1 pixel 以内。实验结果表明,算法可以克服一定的运动模糊的影响。

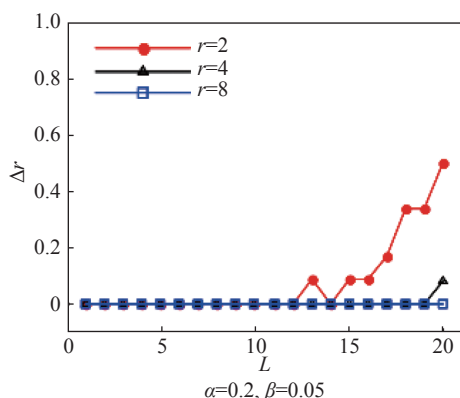


图 9 运动模糊对离焦估计的影响

Fig. 9 Influence of noise on defocusing estimation

#### 4.2 离焦半径估计实验

在图 10 的实验平台上拍摄标定靶,进行了实际图像的离焦估计实验。镜头为星特朗 NexStar8SE 望远物镜,口径为 203 mm,焦距为 2032 mm,工业相机为 PointGrey FL3-GE-50S5M-C,像元尺寸为  $3.45 \mu\text{m}$ ,分辨率为  $2448 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$ 。拍摄目标为 USAF1951 分辨率鉴别板和  $7 \times 7$  阵列、直径为 10 mm 的圆点标记靶,如图 10 所示。自动调焦座,由步进电机驱动,像距控制精度为 0.01 mm,行程为  $-10 \sim 10 \text{ mm}$ 。测距仪为 LTI-S200 激光测距仪,量程为  $0.46 \sim 750 \text{ m}$ ,测量精度为 0.04 m,输出频率约为 10 Hz,安装在镜筒鸠尾板支架前端。在学校校园内,清晨、微风、较高能见度条件下进行了实验。



图 10 实验场景

Fig. 10 Experimental scenario

将标定靶置于约 60 m 远处,复位调焦座,使调焦距离  $v_x = 0$ ,调节手动调焦旋钮使人眼观察到清晰图像。控制调焦座使  $v_x$  从  $-1 \text{ mm}$  到  $2 \text{ mm}$  低速运动,每次移动约  $0.05 \text{ mm}$  后拍摄图像,得到共计 70 幅图像。图 11(a)为从几个典型拍摄图像中截取的圆点图像。采用提出的离焦估计算法,计算每幅图像的离焦半径,其中,中值滤波窗口为  $7 \text{ pixel} \times 7 \text{ pixel}$ ,阈值  $\Delta\theta = 5$ ,  $\alpha = 0.2$ ,  $\beta = 0.05$ 。由于有些图像中离焦程度较大,当估计的半径大于 9 pixel 时,将图像缩小一半后进行离焦估计,然后将估计值放大两倍,这样最大离焦半径将扩大到 18 pixel。得到离焦半径  $r$  后,由公式(6)和像元尺寸,可计算出模糊圆半径  $R$ 。实验结果如图 11(b)所示,模糊圆半径  $R$  与调焦像距  $v_x$  间是有明显折线的线性关系,这与式(4)相吻合,证明了该算法的有效性。

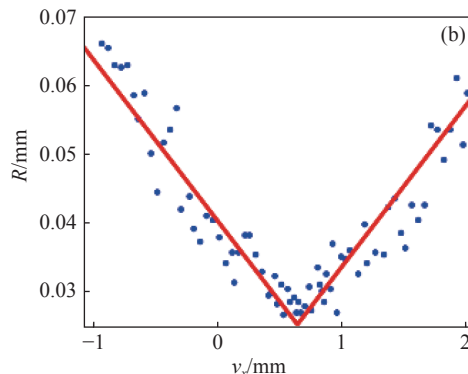
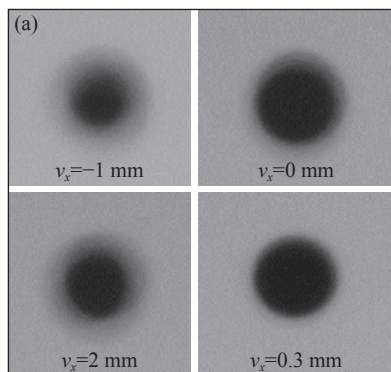


图 11 离焦半径估计结果。(a)不同调焦距离的圆点离焦图像;(b)离焦半径分布图

Fig. 11 Results of defocus radius estimation. (a) Defocused circle images under different focusing distances; (b) defocus radius distribution.



另外,使用该实验图像,与典型的图像清晰度评价函数的处理结果做了对比,如图12所示。选用的图像清晰度函数分别有 EOG<sup>[6]</sup>、Brenner、信息熵 Entropy<sup>[7]</sup> 和频域 FFT<sup>[8]</sup>。图12给出了这些图像清晰度评价归一化结果 IQA 的分布。从图中可以看出,在 $v_x$ 处于0到1 mm之间时,大部分函数均可以取得较大值,但是存在伪峰,选择性不好,通过搜索也很难找到准确的正焦调焦距离,而且不容易通过拟合求解最大值。

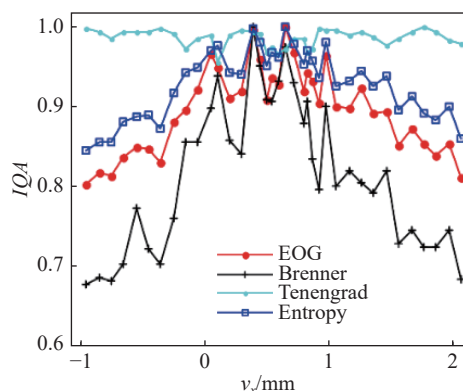


图12 图像清晰度评价

Fig. 12 Image definition evaluation

对比图11(b),虽然离焦半径估计受到噪声和抖动的影响,分布具有一定的随机性,但是由于 $R$ 与 $v_x$ 之间存在线性关系,根据公式(4)进行最小二乘折线拟合,得到最优拟合参数为: $v_{xf} = 0.63$ ,  $k_0 = 0.421$ ,  $k_1 = 0.0256$ ,拐点 $v_{xf}$ 就是正焦位置。即在60 m距离拍摄时,得到唯一的正焦调焦距离为0.63 mm。

实验证明,由圆边响应曲线估计的离焦半径能够实现图像清晰度评价的功能,而且有更好的线性分布特性,能够估计唯一的正焦点。

#### 4.3 物距偏差的标定实验

分别在35~40 m、43~52 m、50~62 m,3个成像区间内进行物距标定实验。每个区间内,标靶每次移动约0.8 m,在每个位置微调调焦座完成正焦调焦距离的估计,得到34个 $\langle u_0, v_{xf} \rangle$ 数据。使用公式(5)优化求解, $f(\Delta u)$ 和 $\Delta u$ 的关系如图13所示。由图13可知,当 $\Delta u = 427$  mm时, $f(\Delta u)$ 取得最小值。因此, $\Delta u$ 的标定值为427 mm。

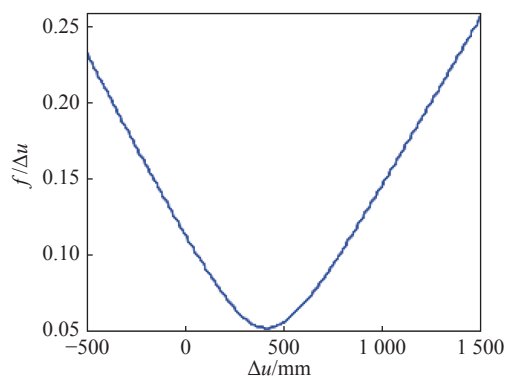


图13 物距偏差的优化曲线

Fig. 13 Optimized curve of object distance deviation

#### 4.4 自动调焦实验

标定完成后,进行自动调焦实验,用来验证离焦半径估计和调焦标定结果的正确性。

首先,将标靶置于约47 m处,此时测得 $u_0 = 46.735$  m,将电动调焦座置零后,进行手动调焦,获得清晰图像。然后,控制电动调焦座从-2 mm移动至2 mm,每次移动0.05 mm,在每个调焦位置 $v_x$ 采集图像,并估计离焦半径 $R$ 。根据多组 $\langle v_x, R \rangle$ 数据拟合出公式(4)所示的折线方程,得到正焦调焦距离 $v_{xf} = 0.691$ ,计算得到初始像距 $v_0 = 2122.801$  mm。

然后,保持手动旋钮锁定状态,将标靶从43 m处开始,每次移动约0.7 m,直至移动到52 m结束。每次移动标靶后,读出测距仪测量的 $u_0$ 值,由前面确定的 $\Delta u$ 和 $v_0$ ,计算出 $v_{xf}$ ,电动调焦座自动跟踪该调焦距离,调焦完成后自动采集图像,得到16幅清晰图像。

图14(a)上、14(a)下分别为最近点43.10 m和最远点52.12 m处采集到的两幅图像,图14(b)上、14(b)下分别为图14(a)上、14(a)下中心标记区域的放大图。从图中可以看出,可分辨线条分别达到第0~6组和第0~4组,线宽分别为0.25 mm和0.354 mm。根据瑞利分辨极限,该成像系统在43.10 m和52.12 m处的理论分辨线宽分别为0.135 mm和0.165 mm,由此可见,实际的物理分辨率接近光学理论值的一半,达到较好的对焦效果。对上述16幅清晰图像进行离焦半径估计,以定量评估其清晰程度,离焦半径和成像距离的关系如图15所示。可以看出,在43.10 m

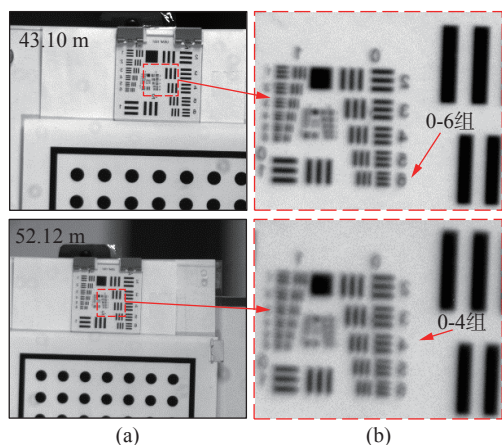


图 14 自动调焦成像。(a)正焦图像;(b)分辨率板图像。

Fig. 14 Autofocus imaging. (a) Focused images; (b) resolution board images.

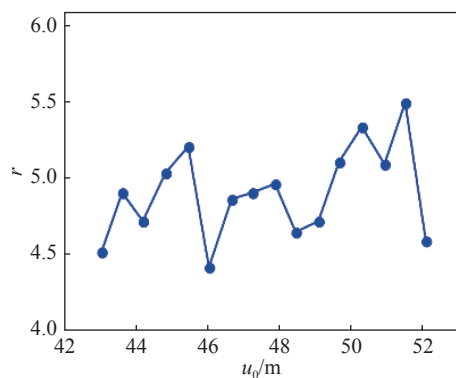


图 15 自动调焦图像离焦半径评价

Fig. 15 Evaluation of defocus radius of autofocus images

#### 参考文献:

- [1] VALENÇA J, PUENTE I, JÚLIO E, *et al.*. Assessment of cracks on concrete bridges using image processing supported by laser scanning survey[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 146: 668-678.
- [2] ZHANG Y P, LIU L Y, GONG W T, *et al.*. Autofocus system and evaluation methodologies: a literature review[J]. *Sensors and Materials*, 2018, 30(5): 1165-1174.
- [3] 梁翠萍, 李清安, 乔彦峰, 等. 简析光学系统自动调焦的方法[J]. *电光与控制*, 2006, 13(6): 93-96.  
LIANG C P, LI Q A, QIAO Y F, *et al.*. On auto-focusing technology of optical system[J]. *Electronics Optics & Control*, 2006, 13(6): 93-96. (in Chinese)
- [4] 黄垒, 辛立平, 韩旭辉, 等. 广角天文望远镜的自动调焦[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(1): 174-183.  
HUANG L, XIN L P, HAN X H, *et al.*. Auto-focusing of wide-angle astronomical telescope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(1): 174-183. (in Chinese)
- [5] 李长春, 程国民, 曹永刚. 自动调焦系统速度评估与仿真[J]. *液晶与显示*, 2019, 34(5): 515-520.  
LI CH CH, CHENG G M, CAO Y G. Evaluation and simulation of auto-focus system speed[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2019, 34(5): 515-520. (in Chinese)
- [6] 郭敬滨, 冯华杰, 王龙, 等. 基于梯度能量函数的调焦窗口构建方法[J]. *红外技术*, 2016, 38(3): 197-202.  
GUO J B, FENG H J, WANG L, *et al.*. Design of focusing window based on energy function of gradient[J]. *Infrared*

和 52.12 m 的成像距离内, 离焦半径在 4~5.5 pixel 内波动, 最大偏差为 1.5 pixel, 说明自动调焦系统具有较好的稳定性。另外, 系统自动记录了调焦控制器的自动调焦时间, 在每个成像位置, 自动调焦处理时间在 0.4 s 以内。

上述实验结果说明, 实验得到的各个参数是准确的, 所提自动调焦方法是有效的, 拍摄图像具有较高的物理分辨率, 而且自动调焦速度快, 为高效率的扫描成像提供了保证。

## 5 结 论

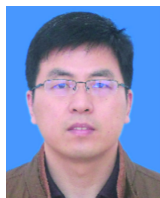
本文建立了圆边响应曲线离焦估计模型, 利用圆点图案边缘的灰度响应曲线与高斯点扩散函数半径之间的代数关系及其逆运算, 并采用双阈值均值滤波, 实现了模糊图像的离焦半径估计。

根据离焦半径与调焦距离之间的线性关系, 采用折线拟合方法有效确定正焦调焦距离, 解决了存在噪声和抖动时, 图像清晰度评价函数出现伪峰而无法选择正焦点的问题。

采用优化求解方法实现了测距调焦系统的物距偏差标定。通过自动调焦实验, 证明了该标定算法的实际可行性, 成像系统在 43~52 m 之间的物理分辨率接近理论值的一半, 分辨线宽优于 0.354 mm, 调焦时间普遍低于 0.4 s。

- Technology*, 2016, 38(3): 197-202. (in Chinese)
- [7] 朱铮涛, 黎绍发, 陈华平. 基于图像熵的自动聚焦函数研究[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(5): 537-542.  
ZHU ZH T, LI SH F, CHEN H P. Research on auto-focused function based on the image entropy[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12(5): 537-542. (in Chinese)
- [8] 王冠军. 基于图像处理的光电测量设备自动调焦方法研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2016.  
WANG G J. Research on auto-focusing method of photoelectric measurement equipment based on image processing[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)
- [9] 黄艳, 徐巧玉, 叶东, 等. 基于微分图像自相关的自动对焦法[J]. *光学学报*, 2010, 30(12): 3435-3440.  
HUANG Y, XU Q Y, YE D, *et al.*. Auto-focus method based on autocorrelation of derivative image[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(12): 3435-3440. (in Chinese)
- [10] TANG T Y, CHEN Q, FENG SH J, *et al.*. Active depth estimation from defocus using a camera array[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(18): 4960-4967.
- [11] WANG Y R, FENG H J, XU ZH H, *et al.*. Fast auto-focus scheme based on optical defocus fitting model[J]. *Journal of Modern Optics*, 2018, 65(7): 858-868.
- [12] SUN H D, ZHAO ZH J, JIN X S, *et al.*. Depth from defocus and blur for single image[C]. *Proceedings of 2013 Visual Communications and Image Processing, IEEE*, 2013.
- [13] 李启辉, 丁亚林, 修吉宏, 等. 基于图像处理的自准直检焦方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(2): 021104.  
LI Q H, DING Y L, XIU J H, *et al.*. Self-collimation inspection and focusing method based on image processing[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(2): 021104. (in Chinese)
- [14] 王佳松, 孙海江, 江山, 等. 一种灰度梯度暗通道图像自动调焦方法[J]. *液晶与显示*, 2018, 33(8): 669-675.  
WANG J S, SUN H J, JIANG SH, *et al.*. Auto-focusing method based on gray gradient and dark channel[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2018, 33(8): 669-675. (in Chinese)
- [15] JEON J, YOON I, KIM D, *et al.*. Fully digital auto-focusing system with automatic focusing region selection and point spread function estimation[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2010, 56(3): 1204-1210.
- [16] 王昊, 张涛, 张振, 等. 单幅图像估计离焦量的航空摄像机自动调焦系统[J]. *液晶与显示*, 2018, 33(8): 669-675.  
WANG H, ZHANG T, ZHANG ZH, *et al.*. System of aerial camera auto-focus based on defocus estimate by single image[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2018, 33(8): 669-675. (in Chinese)
- [17] ZHANG X B, FAN F M, GHEISARI M, *et al.*. A novel auto-focus method for image processing using laser triangulation[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 64837-64843.

#### 作者简介:



罗其俊(1982—),男,湖北孝感人,博士研究生,讲师,2008年于中国民航大学获得硕士学位,现为中国民航大学电子信息与自动化学院讲师,主要从事机器视觉和智能控制系统方面的研究。  
E-mail: qjluo@cauc.edu.cn